中国智慧冷链发展水平评价及对策建议

杨　霖[1,2,3,4]，杨　斌[1,2,3]，任青山[1,2,3]，杨信廷[1,2,3]，韩佳伟[1,2,3*]

（1. 北京市农林科学院信息技术研究中心，北京 100097；2. 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程研究中心，北京 100097；3. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室，北京 100097；4. 仲恺农业工程学院 信息科学与技术学院，广东广州 510225）

摘　要：新一代信息技术促使冷链智能化水平得以快速发展，精准把控智慧冷链发展水平是实现技术瓶颈重点突破与发展方向战略布局的前提基础与保障。基于此，本研究从供给能力、仓储能力、运输能力、经济效益、信息化水平等维度构建了中国智慧冷链发展评价指标体系，运用熵权法并结合优劣解距离法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS）对2017—2021年中国30个省市（不包含西藏、香港、澳门、台湾）的智慧冷链发展水平进行定量评价，通过探索性空间数据分析法（Exploratory Spatial Data Analys，ESDA）和地理加权回归（Geographically Weighted Regression，GWR）分析评价指标对不同省市的影响变化。研究结果表明，经济发展状况、配套设施建设与信息化水平对智慧冷链建设影响作用较大；东部沿海地区智慧冷链发展普遍较好，西南和西北地区发展缓慢，整体发展较为落后；评价指标具有显著时空异质性，影响程度随空间位置和时间发生变化。为提升中国智慧冷链整体发展水平，就加强配套设施建设、促进信息化转型升级提出相应发展对策。本研究可为实现中国智慧冷链全局性谋划、战略性布局、整体性推进等提供科学依据。

关键词：智慧冷链；熵权法；TOPSIS；探索性空间分析；地理加权回归；评价指标体系；信息化水平

中图分类号：F253.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202302003

引用格式：杨霖, 杨斌, 任青山, 杨信廷, 韩佳伟. 中国智慧冷链发展水平评价及对策建议[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(1): 22-33.

YANG Lin, YANG Bin, REN Qingshan, YANG Xinting, HAN Jiawei. Evaluation and countermeasures on the development level of intelligent cold chain in China[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(1): 22-33.

1　引　言

中国是生鲜农产品产销与进出口大国，随着产业规模持续扩张与消费者多层次需求的日益提升，必须借助冷链物流提升农产品销售半径与流通周期，助推农产品提质升级与农业品牌化发展。然而，中国农产品冷链物流起步晚、信息化发展滞后，相比西方国家仍存在冷链流通率低且腐损率高等问题。随着近年来新一代信息技术与冷链物流的深入融合，中国智慧冷链的发展得以飞速发展，为提升冷链储运环境精准调控、保障农产品品质安全以及提升冷链整体经济效益等奠定了关键基础。然而，中国区域经济发展不平衡不充分问题仍然突出，加之区域间饮食文化与地理环境的差异，导致各区域冷链物流基础设施建设、技术创新融合与智能化转型等方面发展严重失衡，全国尺度下的政策制定、标准推行、成效评价等可能与区域发展存在严重冲突，缺乏公平性、普适性及可操作性。因此，构建中国智慧冷链发展水平综合评价体系，深入解析中国智慧冷链发展水平差异性特征及形成缘

收稿日期：2023-02-06

基金项目：北京市农林科学院科技创新能力建设专项（KJCX20210408）；国家重点研发计划课题（2022YFD2001804）；北京市农林科学院科研创新平台建设（PT2023-24）

作者简介：杨　霖，硕士研究生，研究方向为智慧供应链关键技术。E-mail：yanglinear@163.com

*通信作者：韩佳伟，博士，高级农艺师，研究方向为智慧供应链关键技术。E-mail：hjwlove8@163.com

由，对瓶颈问题的精准发力与重点突破，制定针对性的优化对策建议，以及实现全局性谋划、战略性布局与整体性推进具有重要实际应用价值。

近年来冷链物流发展水平评价体系建立成为相关学者研究的热点之一[1-4]，为客观评价中国冷链物流发展水平，推动冷链物流高质量发展提供了理论支持与有益借鉴。郭明德和李红[5]基于因子分析法研究了典型省市农产品冷链物流发展水平，结果表明东部沿海地区发展水平高于中部省市，西部省市最低。王珊珊和魏瑶[6]使用因子分析法对国内开展了农产品冷链物流发展水平的研究，结果表明各地区冷链物流发展水平之间存在严重不均衡、不充分问题，特别是青海、宁夏等西北地区存在发展力不足，设施不健全等问题。张妍[7]采用调研方式建立了生鲜农产品冷链物流发展评价体系，并结合层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）分析了生鲜农产品发展影响因素指标权重，结果表明专业人才比例对冷链物流发展水平提升最为重要，并提出相关人才培养对策建议。剌美香和李玉萍[8]通过模糊层次分析法（Fuzzy Analytic Hierarchy Process，FAHP）构建了山西省农产品冷链物流发展水平评价模型，并基于现有发展水平指数提出了针对性对策建议。部分学者在研究过程中使用层次分析法或其变体来确定影响因素的权重，其计算过程需要多位行业专家参与构建判断矩阵，当判断矩阵不满足一致性检验时还需进行修正，赋权过程复杂且易受主观因素的影响。此外，借助新一代信息技术推进冷链物流智能化发展已成为时代需求与发展趋势，然而，目前围绕冷链物流智能化发展水平评价体系研究却鲜有报道。

熵权法是一种客观赋权算法，可以减少人为因素对评价指标赋权的影响，目前已被成功应用于东部地区水产冷链物流[9]、生鲜农产品物流安全[10]、中部地区农产品物流[11]、低碳物流[12]和全国物流[13]等发展水平评价方面，但在中国智慧冷链物流发展现状定量评价方面的应用研究尚需进一步研究。为综合分析与量化评价中国智慧冷链发展水平，本文首先在生鲜农产品冷链物流研究基础上，构建智慧冷链发展水平评价体系。其次，使用熵权法对评价指标进行客观赋权，并通过优劣解距离法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS）综合量化国内各省市智慧冷链发展水平。最后，利用探索性空间数据分析法（Exploratory Spatial Data Analys，ESDA）和地理加权回归法（Geographically Weighted Regression，GWR）分析智慧冷链评价指标影响作用的时间与空间分布，揭示区域差异性和影响因素的时空异质性，并根据研究结果提出中国智慧冷链发展对策。

2　评价体系构建

2.1 评价指标设计原则

智慧冷链发展水平评价体系的构建是客观评价智慧冷链发展水平的重要步骤，是对评价指标进行科学合理选取过程，其评价指标的选取应遵循以下原则。

（1）全面性。评价指标应客观体现冷链行业发展特点，综合反映冷链智能化建设状况，多维度展现中国智慧冷链发展水平。

（2）代表性。评价指标应具有代表性，能够从不同方面体现智慧冷链发展水平，明确每个评价指标的特性，避免指标间含义重叠。

（3）可实现性。评价指标的数据须易获取且计算方法简单，使其具有较强的可操作性，以便实现定量计算和分析。

2.2 评价指标体系

基于对生鲜农产品冷链和冷链发展水平评价体系的研究，将智慧冷链发展水平的影响因素分为供给能力、仓储能力、运输能力、经济效益和信息化水平五种。

（1）供给能力。稳定生鲜农产品供应是推动智慧冷链持续发展重要因素，规模化生产作业可以避免因供应不及时导致冷链断链。从供给维度分析影响智慧冷链高质量发展的因素有人均生鲜农产品产量和货物运输量。人均生鲜农产品产量体现该省市生鲜农产品生产供应能力，货物运输量反映该省市生鲜农产品运载供应水平。

（2）仓储能力。完备的冷藏设施和冷链企业是实现智慧冷链高质量运作的基础，是影响智慧冷链

高质量发展的重要因素。从仓储能力维度分析影响智慧冷链高质量发展的因素有人均冷库容量、冷链企业数和从业人员。人均库容量体现冷链低温冷藏储存能力，保障仓储环节生鲜农产品品质；冷链企业数量体现该省市冷链运作能力；从业人员表示该省市冷链物流产业带动就业规模。

（3）运输能力。冷链流通过程中运输配送距离较长，一般为跨区域运输，冷藏车可以实现低温冷藏运输，保障运输途中生鲜农产品质量；从运输能力维度分析影响智慧冷链发展水平的因素有人均冷藏车和公路里程。人均冷藏车反映冷链物流低温运输配送能力，公路里程体现运输便捷程度。

（4）经济效益。高水平经济发展促进消费者对生鲜农产品的需求，而冷链需求增加则会促进智慧冷链高速发展。因此，宏观经济向好的省市，冷链智能化发展水平较高。从经济效益状况维度分析影响智慧冷链发展水平的因素有人均GDP、人均可支配收入、人均需求量和餐饮企业营业额。人均GDP反映该省市宏观经济发展状况，人均可支配收入代表该省市居民消费购买力，人均需求量表示对生鲜农产品需求水平，餐饮企业营业额体现餐饮行业对冷链物流的需求。

（5）信息化水平。冷链与信息技术的融合可以更好地实现上下游主体间的信息共享与资源整合，提高冷链智能化水平，促进智慧冷链高质量发展。从信息化水平维度分析影响智慧冷链发展的因素有电子商务营业额、企业拥有网站数量和使用计算机数量。电子商务营业额反映冷链企业对电子商务技术的应用程度，企业拥有网站数量展现出冷链企业通过互联网开展线上业务水平，计算机数量表示冷链企业使用信息技术进行业务运作的水平。

因此，本研究中智慧冷链发展水平评价体系由冷链供给能力、冷链仓储能力、冷链运输能力、冷链经济效益和冷链信息化水平5个一级指标和14个二级指标构成，如图1所示。

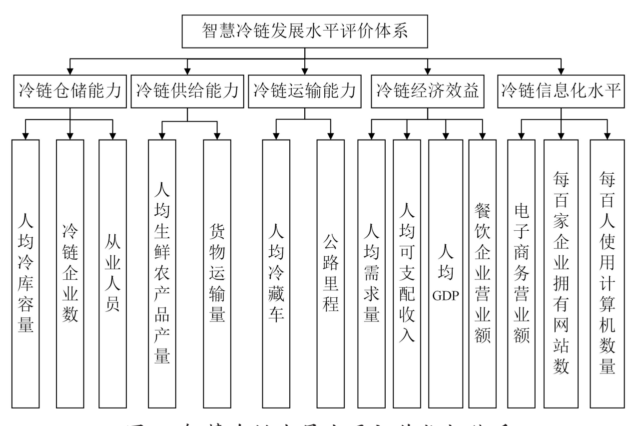


图1　智慧冷链发展水平评价指标体系

Fig. 1　Evaluation indicators system of intelligent cold chain development level

3　评价方法

3.1　数据预处理

本研究中使用的冷链物流数据来源于2017—2021年《中国统计年鉴》《中国冷链物流发展报告》和交通运输部统计数据，其中冷链企业数通过《中国冷链物流发展报告》获取，从业人员、人均生鲜农产品产量、公路里程、人均可支配收入、人均需求量、人均GDP、餐饮企业营业额、电子商务营业额、每百家企业拥有网站数和每百人使用计算机数量来自于《中国统计年鉴》，货物运输量来源于交通运输部统计数据，人均冷库容量和人均冷藏车经《中国冷链物流发展报告》和《中国统计年鉴》计算得到。为实现指标间可比性，提高权重计算精确度，采用极大极小值法对原始指标数据进行标准化处理，计算方法如公式（1）。

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_j^{\min})/(X_j^{\max} - X_j^{\min}) \quad (1)$$

其中，$i = 1, 2, 3, \cdots, m$；$j = 1, 2, 3, \cdots, n$；m为省市数量，n为评价指标数量，X_{ij}为表示第i个省市第j项指标的原始数据值；Z_{ij}表示标准化后的指标数据值，$X_j^{\min}$为第j项指标中最小值，$X_j^{\max}$表示第j项指标中最大值。

3.2　熵权法

信息论中熵可以度量信息量的大小，熵值用来判断评价指标的离散程度，信息熵值越小，指标的离散程度越大，该指标影响程度越高，即权重越高。熵权法[14, 15]是一种客观赋权法，可以避免因主观因素造成权重不合理的情况。熵权法计算权重步骤如下。

计算第i个省市第j项指标数值比重P_{ij}，见公式（2）。

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} Z_{ij}} \tag{2}$$

计算第j项指标熵值E_j，见公式（3）。

$$E_j = -\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} P_{ij} \times \ln P_{ij} \tag{3}$$

计算第j项指标权重W_j，见公式（4）。

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^{n}(1 - E_j)} \tag{4}$$

3.3 TOPSIS法

TOPSIS法[16,17]是通过计算与理想最优解和最劣解的综合距离来进行评价，与最优解距离越近，离最劣解距离最远，评价值越高。计算步骤如下。

确定第j项评价指标的最优解d_j^+与最劣解d_j^-，见公式（5）～（6）。

$$d_j^+ = \max(Z_{1j}, Z_{2j}, \cdots, Z_{mj}) \tag{5}$$

$$d_j^- = \min(Z_{1j}, Z_{2j}, \cdots, Z_{mj}) \tag{6}$$

计算与最优解的距离T_i^+和与最劣解的距离T_i^-：

$$T_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} W_j(d_j^+ - Z_{ij})^2} \tag{7}$$

$$T_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} W_j(d_j^- - Z_{ij})^2} \tag{8}$$

计算贴近度S_i，见公式（9）。

$$S_i = \frac{T_i^-}{T_i^+ + T_i^-} \tag{9}$$

其中，S_i为第i省市智慧冷链发展水平，数值越大，该省市智慧冷链发展水平越好。通过对S_i比较，实现各省市智慧冷链物流发展水平综合排序。

3.4 探索性空间数据分析法ESDA

ESDA[18,19]通过计算空间数据自相关性，研究数据的空间分布，识别空间异常位置，探索隐含空间位置关系，分为全局空间自相关和局部空间自相关。通过ESDA研究国内各省市智慧冷链在空间分布中的差异和变化情况，为下步使用地理加权回归方法做基础。

3.4.1 全局空间自相关

主要用来研究某指标整体发展的空间关联性和差异程度，使用全局Moran's I指标进行估计，其计算方法为公式（10）。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\omega_{ij}(Z_i - \bar{Z})(Z_j - \bar{Z})}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\omega_{ij}\sum_{i=1}^{m}(Z_i - \bar{Z})} \tag{10}$$

其中，I为全局空间自相关系数；Z_i和Z_j是第i个和第j个省市的智慧冷链发展水平；$\bar{Z}$为智慧冷链平均发展水平；ω_{ij}为第i个和第j个省市的邻接关系，当i和j省市相邻时，$\omega_{ij}=1$，若不相邻，则$\omega_{ij}=0$；I取值范围为［−1，1］，正值表示智慧冷链发展水平较高或较低的区域在空间中显著聚集，负值则表示该省市与邻近省市的智慧冷链发展水平有显著空间差异，若I越趋向于1，则整体智慧冷链空间差异越小，反之空间差异越大。

3.4.2 局部空间自相关LISA

通过局部空间自相关（Local Indicators of Spatial Association，LISA）[20]可以衡量省市与邻近省市间的空间差异性及其显著程度，结合局部空间自相关聚集图研究空间分布特征，其计算方法为公式（11）。

$$I_l = \frac{(Z_i - \bar{Z})\sum_{j=1}^{m}(Z_j - \bar{Z})}{\sum_{i=1}^{m}(Z_i - \bar{Z})^2} \tag{11}$$

在指定显著水平下，I_l为正数则表示存在正局部空间自相关，发展水平相近值存在聚集；若为负数则表示存在负局部空间自相关，发展水平不相近值存在聚集。

3.5 地理加权回归法GWR

GWR[21,22]是在回归参数中引入地理位置，通过邻近省市发展水平信息进行局部回归估计，其回归参数随空间地理位置变动发生变化，可用于解释智慧冷链发展水平与影响因素之间的空间关系，其表达式为公式（12）。

$$S_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i)Z_{ik} + \varepsilon_i \tag{12}$$

其中，S_i是第i省市的智慧冷链发展水平；Z_{ik}是第i省市第k项评价指标数据；$\beta_k(\mu_i, v_i)$代表第k项影响指标在第i省市的回归系数；(μ_i, v_i)为第i省市地理位置；ε_i为服从方差为常数的正态分布。

本文使用固定距离法核函数，利用最小信息准则确定最佳带宽，然后进行GWR计算。

4 评价结果分析

4.1 指标权重分析

通过熵权法对2017—2021年冷链数据进行计算，确定相应年份智慧冷链发展评价指标权重，本文仅展示了2021年指标权重结果（见表1）。从表1中可以看出，2021年二级指标中人均冷藏车、电子商务销售额、餐饮企业营业额影响较大，人均冷藏车最为重要，权重为0.1343，冷藏车在流通过程中保持低温环境，保障生鲜农产品质量。第二位是电子商务销售额，权重为0.1274，通过电商平台进行销售，提高冷链经济效益，有利于信息技术融合，促进智慧冷链发展。第三位是餐饮企业营业额，权重为0.1252，通过餐饮行业对生鲜农产品进行分销，促进智慧冷链高速发展。

表1 2021年智慧冷链发展水平评价指标权重

Table 1 Weights of indicators for evaluating the development level of intelligent cold chain in 2021

一级指标	权重	排序	二级指标	权重	排序
冷链供给能力	0.1087	5	人均生鲜农产品产量	0.0608	8
			货物运输量	0.0479	11
冷链仓储能力	0.2230	2	人均冷库容量	0.0966	4
			冷链企业数	0.0754	6
			从业人员	0.0510	10
冷链运输能力	0.1750	4	人均冷藏车	0.1343	1
			公路里程	0.0407	12
冷链经济效益	0.2873	1	人均需求量	0.0173	14
			人均可支配收入	0.0807	5
			人均GDP	0.0641	7
			餐饮企业营业额	0.1252	3
冷链信息化水平	0.2060	3	电子商务销售额	0.1274	2
			每百家企业拥有网站数	0.0202	13
			每百人使用计算机数量	0.0584	9

一级指标中经济效益比重最大为0.2873，经济发展对于智慧冷链发展具有重要影响，高水平经济推动智慧冷链物流高质量发展。第二位是仓储能力，权重为0.2230，基础建设是智慧冷链的硬实力，保障冷链流通作业。第三位是信息化水平，权重为0.2060，信息化水平对智慧冷链发展重要，信息技术融合程度越高，智慧冷链建设越强。第四位是运输能力，权重是0.1750，冷藏运输可以保证生鲜农产品品质，提高智慧冷链服务质量。虽然二级指标中人均冷藏车权重最为重要，但在一级指标归类时，冷链运输能力仅包含人均冷藏车和公路里程两个二级指标，且相比其他二级指标，公路里程权重较小，导致在一级指标权重排序时冷链运输能力权重仅为第四位。第五位是供给能力，权重为0.1087，稳定的生鲜农产品供应保障智慧冷链正常运作，有助于提升智慧冷链综合实力。

4.2 发展水平分析

通过TOPSIS法综合分析2017—2021年中国30个省市（不含西藏、香港、澳门、台湾）智慧冷链发展水平如图2所示，首先对各省市智慧冷链发展进行分析，由各省市的年份柱形长度变化可知，不同省市间的智慧冷链发展水平起伏较大，上海、北京、广州智慧冷链发展水平最好，远超其余省市，青海、甘肃发展最差。虽然绝大部分省市智慧冷链发展水平较低，但多数省市智慧冷链发展势头较好。其次分区域对地区智慧冷链发展水平进行研究，华东沿海地区整体柱形长度最长，表明华东地区2017—2021年总体发展最好，明显优于其他地区，其次是华南和华北地区，智慧冷链发展最为落后的为西北和西南地区。区域间整体差距较大，并且差距随时间变化越来越大，构成了东强西弱，南强北弱现状。

图3为2017—2021年中国智慧冷链发展水平地理分级图。首先从图3可知中国各省市智慧冷链发展分为四类等级，第一类评价得分大于0.5，有上海、广东、北京，这3个省市一直处于第一梯队，2017—2021年从未发生变化，主要是因为该类省市经济发达、人均可支配收入高、生鲜农产品需求量大、基础设施建设完备、地理位置便利、冷链企业数量充足、信息化技术应用率高，智慧冷链发展最好。第二类评价得分在0.3~0.5之间，在2017—2018年期间有江苏、山东、浙江、天津、河南，但在2019—2021年减少为江苏、山东、浙江、天津，该类省市经济发展向好，人均可支配收入较高，生鲜农产品产量多、基础设施建设达标、冷链企业数

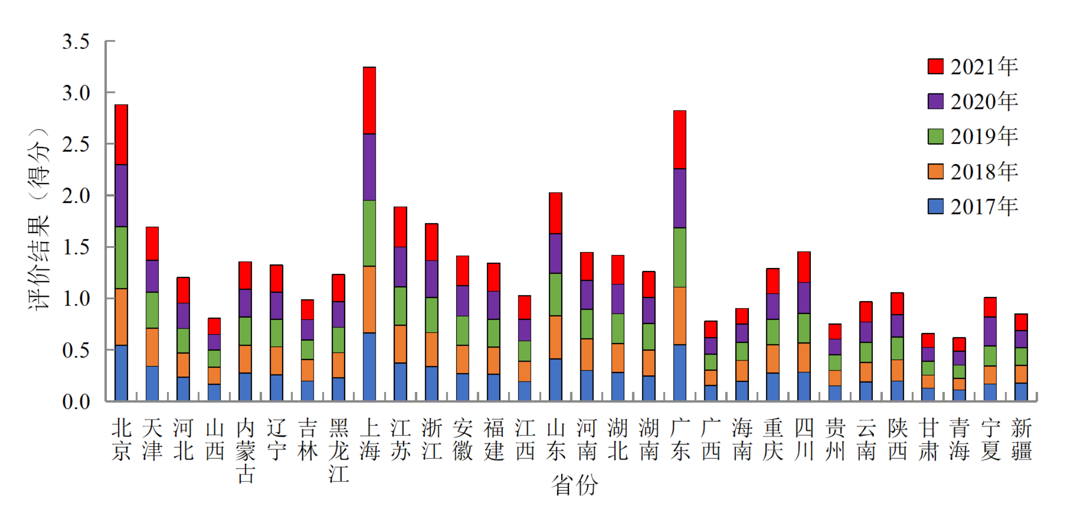


图 2　2017—2021 年中国智慧冷链发展水平评价结果

Fig.2 Evaluation results of China's intelligent cold chain development level from 2017 to 2021

量多，智慧冷链发展较好。处于第三类和第四类等级中的省市变化较大，例如，陕西在2017年处于第四等级，而到2018年就发展上升为第三等级；而江西2019年之前一直处于第四等级，到2020年才发展为第三等级。吉林省在2017年处于第四等级，到2018年上升为第三等级，但在2019年却下降到第四等级，并一直持续到2021年。宁夏2019年之前一直处于第四等级，到2020年才提升为第三等级，但在2021年就下降为第四等级。其中第三类得分在0.2～0.3之间，主要有四川、安徽、湖南、河北等，该类地区经济发展适中，人均可支配收入一般、基础设施建设不足、冷链企业数量较少，信息技术利用率低，智慧冷链发展一般。第四类为得分在0.2以下，主要有云南、吉林、宁夏等，该类地区经济发展较为落后，基础设施明显欠缺，冷链企业不足，人均可支配收入较少，智慧冷链发展较差。

4.3 全局空间自相关分析

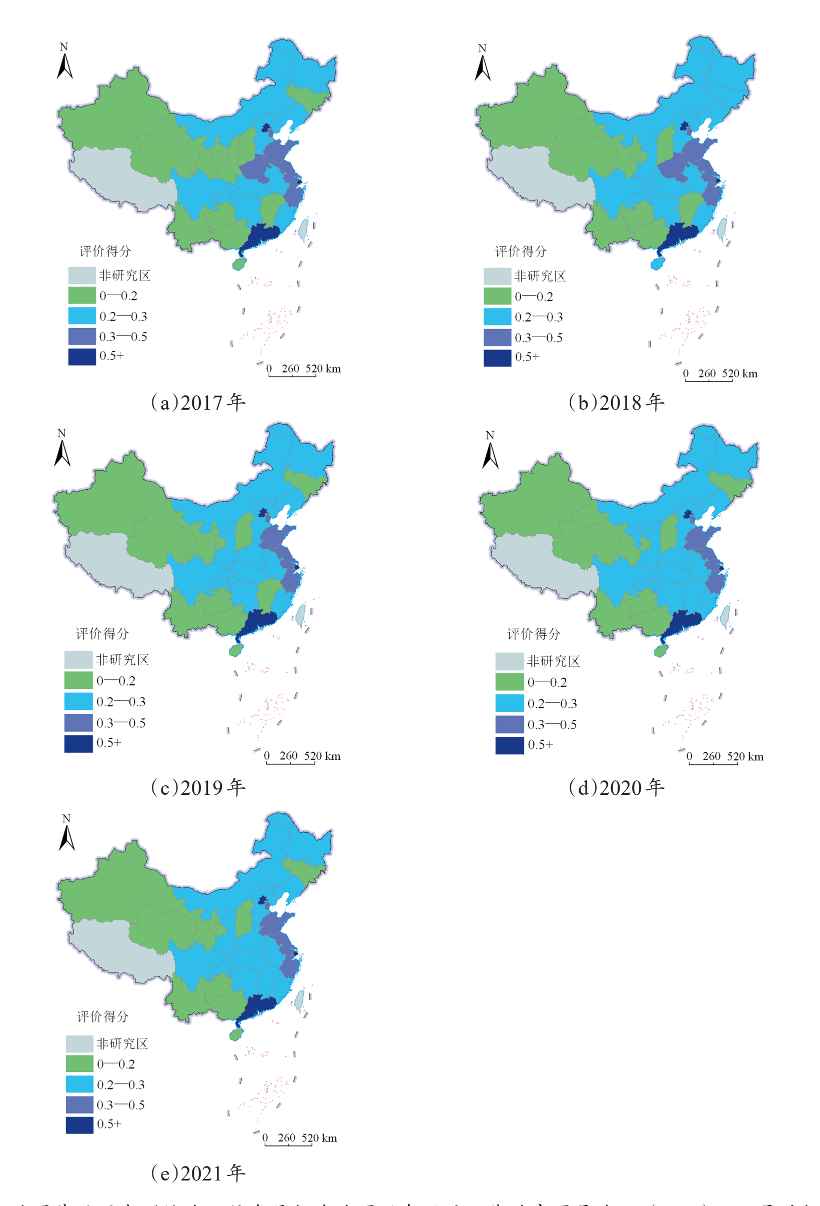
对中国智慧冷链发展水平结果进行全局自相关分析，Moran's *I* 变化曲线如图4所示。2017—2021年中国各省市智慧冷链发展存在空间正相关性，总体空间相关性呈先下降后上升趋势，下降趋势逐渐减慢，下降幅度大于上升幅度。表明自2017年以来中国智慧冷链发展水平相似地区在空间中的集中分布性逐渐减弱，2020年到达最低值0.13，然后2021年回升到0.168，但依然低于2017年，说明中国在智慧冷链物流建设过程中总体空间差异性在变大。

4.4 局部空间自相关分析

根据各省市智慧冷链发展时空分布特性，绘制2017—2021年LISA聚集图，如图5所示，在5%显著性水平下的进行分析可得，中国智慧冷链发展存在较为显著的差异格局，在华东区域内的省市间存在正空间相关性，与邻近省市间具有相互关联的发展趋势，而在华北和华南区域中存在负空间性，智慧冷链协同发展较差。华东地区局部空间差异性较小，自身与邻近省市的智慧冷链发展均处于较高水平（高-高），主要在上海、浙江、江苏、安徽，天津和山东等地区附近，该区域经济发展较好，冷链基础设施建设完备，地理位置优越，信息技术融合程度高，智慧冷链协同发展性较好。

华北地区空间差异性较大，邻近省市智慧冷链发挥较好但自身发展较差（低-高），主要在河北和山西等地区附近。华南地区空间差异性同样较大，自身智慧冷链发展较好但邻近省市发展较低（高-低），主要在广东附近。

从整体数量角度来看，低-高类型省市数量在2021年之前一直是2个（河北和山西），2021年减少到只有山西省。高-高类型省市从2017年开始逐渐减少，在2019年数量最少，从2020年开始增多，与全局自相关系数变化趋势相吻合。高-低类型省市未发生变化，一直都在广东省附近。不显著区域



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图无修改

图3 2017—2021年中国智慧冷链发展水平地理分级图

Fig. 3 The geographical grading chart of China's intelligent cold chain development level from 2017 to 2021

占绝大数，且不存在低-低区域。与2017年对比，2021年全国智慧冷链发展空间发展格局变化较小，华东区域内各省市间依然存在正空间相关性，华北和华南区域空间性仍较差，说明经过近五年的智慧冷链建设，智慧冷链高发展水平地区其协调带动作用没有发挥出来。

4.5 GWR分析

在进行地理加权回归分析之前，首先通过线性回归分析出智慧冷链评价指标间的线性相关性，然后根据分析结果中膨胀因子（Variance Inflation Factor，VIF），选取VIF<10的评价指标，最后根据选取的评价指标构建GWR模型。2017、2018、2019年GWR建模的6个自变量有人均生鲜农产品产量、货物运输量、公路里程、人均需求量、每百家企业拥有网站数和每百人使用计算机数，2020年GWR模型的7个自变量有人均生鲜农产品产量、货物运输量、人均冷藏车、公路里程、人均需求量、每百家企业拥有网站数和每百人使用计算机数，2021年GWR的5个自变量有人均生鲜农产品产量、公路里程、人均需求量、每百家企业拥有网站数和每百人使用计算机数。为减少不同量纲间的影响，将变量数据进行归一化处理。

根据公式（12）创建2021年GWR模型（公式（13））和2017年GWR模型（公式（14）），将两者进行比较分析。2021年各自变量分别为：人均生鲜农产品产量（PCOFAP），公路里程（HM），人均需求量（PCD），每百家企业拥有网站数量（NWPOE）和每百人使用计算机数量（NCPOP）。2017年各自变量分别为人均生鲜农产品产量（PCOFAP），货物运输量（VT），人均需求量（PCD），每百家企业拥有网站数量（NWPOE）和每百人使用计算机数量（NCPOP）。

$$S_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \beta_1(\mu_i, v_i)(\mathrm{PCOFAP}) + \beta_2(\mu_i, v_i)(\mathrm{HM}) + \beta_3(\mu_i, v_i)(\mathrm{PCD}) + \beta_4(\mu_i, v_i)(\mathrm{NWPOE}) + \beta_5(\mu_i, v_i)(\mathrm{NCPOP}) + \varepsilon_i \tag{13}$$

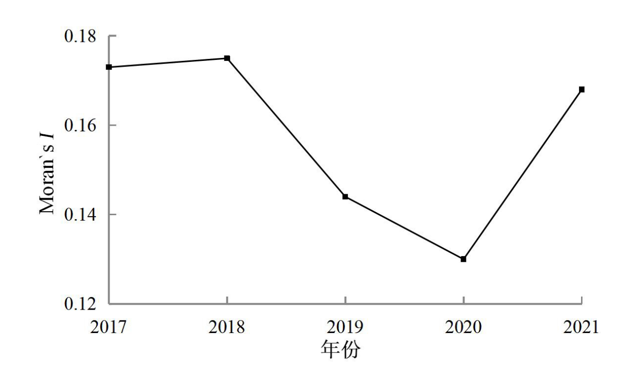


图 4　2017—2021 年中国智慧冷链发展全局自相关系数

Fig. 4　The global autocorrelation coefficient of China's intelligent cold chain development from 2017 to 2021

$$
\begin{aligned}
S_i = {} & \beta_6(\mu_i, v_i) + \beta_l(\mu_i, v_i)(\mathrm{PCOFAP}) + \\
& \beta_7(\mu_i, v_i)(\mathrm{VT}) + \beta_8(\mu_i, v_i)(\mathrm{NWPOE}) + \\
& \beta_9(\mu_i, v_i)(\mathrm{NCPOP}) + \beta_{10}(\mu_i, v_i)(\mathrm{HM}) + \\
& \beta_{11}(\mu_i, v_i)(\mathrm{PCD}) + \varepsilon_i \qquad (14)
\end{aligned}
$$

表2为GWR计算结果，基于局部 R^2 的空间变异性可知，2021年全国各省市拟合程度较为相近，2017年西北地区各省拟合度较高，东北地区省市拟合度较低。由 R^2、调整 R^2 以及残差平方和可知，2021年整体拟合程度较2017年好，表明2021年所选取指标较2017年更为准确和更具代表性。

表3为2017年GWR模型自变量回归系数结果，可以明显看出各自变量对各省市的影响程度存在空间差异。每百人使用计算机数对智慧冷链建设最为重要并呈现正相关性，对各省市智慧冷链的发展产生不同程度影响，在华南地区最为强烈，主要以上海、浙江为主，并逐渐向西北部减弱，影响最小的省市主要集中在新疆、青海地区。

人均需求量对智慧冷链建设的影响次之，与智慧冷链发展呈正相关性，说明人均需求量增加可以提升智慧冷链建设速度，对不同省市的影响程度差异明显，影响较大值在华南和西南地区，影响程度向北逐渐减弱，最小值在黑龙江和新疆地区。

货物运输量对智慧冷链发展影响程度位于第三，对各省市影响差异较大，对西南和西北地区影响最大，影响程度向东逐渐减弱，在东北地区最小。每百家企业拥有网站数对智慧冷链发展影响居于第四，在吉林和黑龙江地区敏感度较大，以此向西南依次减少，到广西、海南、云南地区最弱。公路里程对智慧冷链建设的影响力处于第五，正相关性最小，在吉林和黑龙江最为敏感，向西南和西北地区逐渐减弱，在云南、青海、新疆地区最小。人均生鲜农产品产量对智慧冷链建设影响最小，其影响力从海南地区向北逐渐减弱，到华北和东北地区最小。

表4为通过GWR模型计算2021年自变量回归系数结果，各自变量对于不同省市的影响程度未存在空间差异。每百人使用计算机数对智慧冷链影响最为明显并呈现正相关性，人均需求量正相关影响同样较大。与表3进行比较，2021年每百人使用计算机数和人均需求量对智慧冷链发展影响地位相同，但每百人使用计算机数影响程度在减少，人均需求量影响作用逐渐增减。主要由于智慧冷链建设主要通过智能计算进行信息化转型升级，计算机数量占主要地位，但随着建设进程，大部分冷链企业计算机数量饱和，逐渐转变为以需求为导向的智慧冷链建设。

5　结论与发展对策

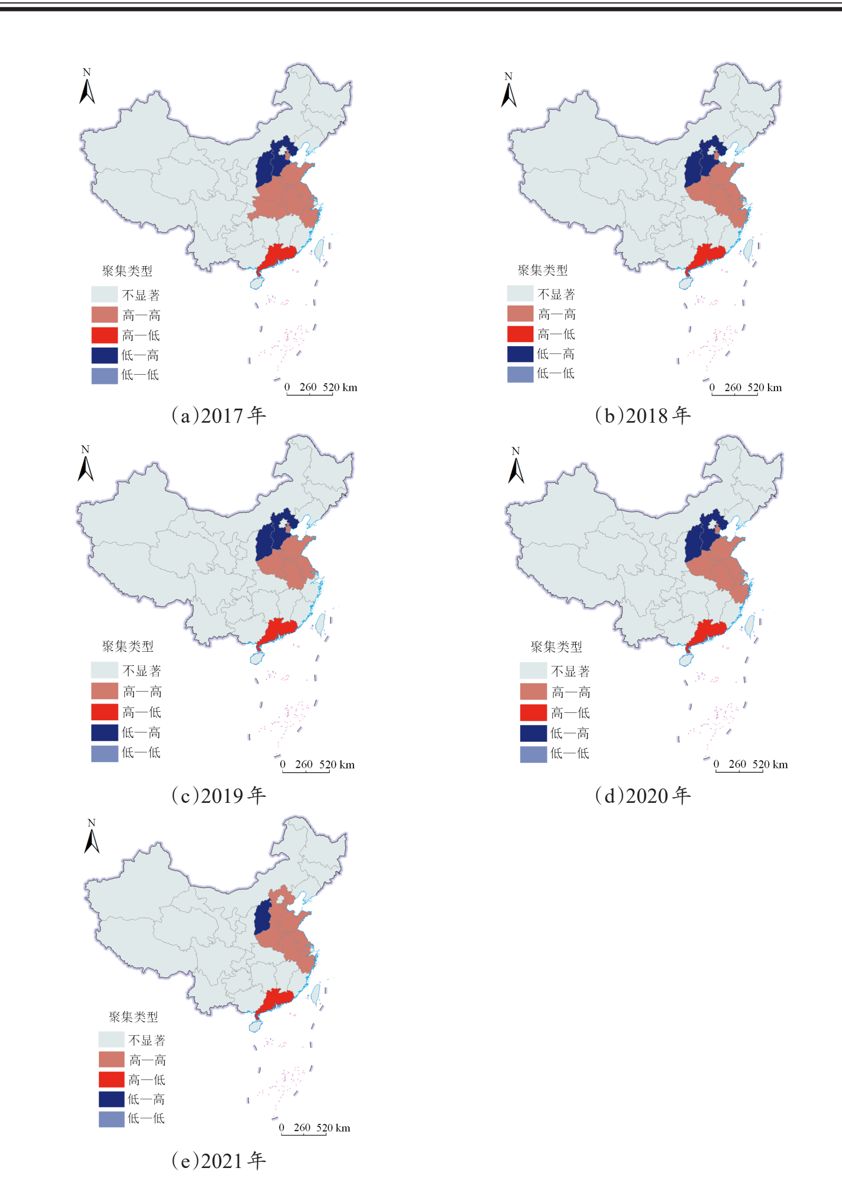
5.1　结论

以客观评价中国智慧冷链发展水平为研究目标，构建智慧冷链发展水平评价体系，结合统计数据，研究2017—2021年各省市智慧冷链发展水平，揭示中国智慧冷链发展的空间相关性，分析智慧冷链影响因素的时空异质性，探究提升中国智慧冷链发展水平对策，得出以下结论。

（1）中国智慧冷链发展水平总体呈上升趋势，东部沿海省市智慧冷链发展水平较高，西北和西南地区发展较为落后，多数省市智慧冷链发展水平较低，整体智慧冷链建设速度较慢。

（2）中国智慧冷链发展存在明显的差异格局，华东地区省市智慧冷链发展呈正空间相关性，华北和华南地区有负空间性，整体发展差距逐渐扩大，区域协同发展较弱。

（3）智慧冷链影响因素的重要程度受时间与空间位置影响，2017年影响因素的时空异质性尤为明显，影响因素的重要性受地理位置变化较为敏感，而2021年影响因素重要性比较稳定，时空异质性不明显。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图无修改

图5 2017—2021年中国智慧冷链发展LISA聚集程度地理分布图

Fig. 5 Geographic distribution map of LISA clustering degree of smart cold chain development in China from 2017 to 2021

5.2 发展对策分析

基于上述研究分析，中国智慧冷链整体规划不足，智慧冷链配套设施不完备、基础设施建设受限、信息技术应用率不高。虽然部分省市智慧冷链发展水平较高，但大部分省市冷链发展较为落后，区域化发展失调，阻碍中国智慧冷链高速发展。为推动中国智慧冷链整体协同发展，提升冷链物流综合实力，提高行业竞争力，建议从加强配套设施建设、促进信息化转型升级方面着手，促进中国智慧冷链高质量发展。

5.2.1 加强智慧冷链配套设施建设

由评价指标的权重可得，冷藏车和冷库容量对智慧冷链物流发展较为重要，同时从各省市冷链物流数据可知，中国冷藏车、冷库容量分布不均匀[23]，偏远地区道路交通不便，预冷设备欠缺，影响生鲜农产品的运输与储存，无法保证生鲜农产品品质安全。因此企业和政府应加强对冷藏设施的投入，加大对冷藏车购买补助，增加冷藏车市场保有量；对技术落后的冷库进行升级[24]，改善冷链仓储环境；加快道路建设，拓展运输路径推动智慧冷链高质量发展。

表2 中国智慧冷链发展水平GWR计算结果

Table 2 GWR calculation results of China's intelligent cold chain development level

指标	2017	2021
局部R^2	0.738～0.769	0.7806～0.7809
R^2	0.7664	0.7808
调整R^2	0.6884	0.7350
残差平方和	0.1138	0.1087

5.2.2 促进冷链物流信息化转型升级

智慧冷链物流发展需要现代信息技术与冷链物流产业融合，构建生鲜农产品智慧冷链物流。电子商务销售额指标对智慧冷链物流发展影响较大，因此可以通过构建冷链物流公共信息服务平台[25]，使用互联网进行网上交易，整合物流资源，实现冷链上下游主体间信息共享，提高流通环节货物衔接效率。同时加大对信息化设备和信息技术培训的投入，以满足冷链物流信息化转型升级的需要，提高

表 3 2017 年智慧冷链 GWR 自变量回归系数与地区分布

Table 3 Regression coefficients and regional distribution of GWR independent variables for intelligent cold chain in 2017

指标名称	回归系数范围	地区
人均生鲜农产品产量	−0.0316~−0.0383	北京,天津,河北,内蒙古,辽宁,吉林,黑龙江
	−0.0383~−0.0493	山西,上海,江苏,浙江,安徽,江西,山东,河南,湖北,重庆,陕西,甘肃,青海,宁夏,新疆
	−0.0493~−0.0573	福建,湖南,广东,广西,四川,贵州,云南
	−0.0573~−0.0619	海南
货物运输量	0.1399~0.1559	辽宁,吉林,黑龙江
	0.1599~0.1699	北京,天津,河北,内蒙古,上海,江苏,山东
	0.1699~0.1797	山西,浙江,安徽,福建,河南
	0.1797~0.1897	江西,湖北,湖南,广东,陕西,宁夏
	0.1897~0.1998	广西,海南,重庆,四川,贵州,甘肃
	0.1998~0.2127	云南,青海,新疆
公路里程	0.0067~0.0166	云南,青海,新疆
	0.0166~0.0289	湖南,广东,广西,海南,重庆,四川,贵州,陕西,甘肃,宁夏
	0.0289~0.0399	河北,山西,内蒙古,江苏,浙江,安徽,福建,江西,河南,湖北
	0.0399~0.0482	北京,天津,辽宁,上海,山东
	0.0482~0.0587	吉林,黑龙江
人均需求量	0.1983~0.1995	黑龙江,新疆
	0.1995~0.2090	北京,天津,河北,山西,内蒙古,辽宁,吉林,上海,江苏,安徽,山东,河南,湖北,重庆,四川,陕西,甘肃,青海,宁夏
	0.2090~0.2166	浙江,福建,江西,湖南,广东,广西,海南,贵州,云南
每百家企业拥有网站数	0.1059~0.1090	广西,海南,云南
	0.1090~0.1189	山西,上海,江苏,浙江,安徽,福建,江西,河南,湖北,湖南,广东,重庆,四川,贵州,陕西,甘肃,青海,宁夏,新疆
	0.1189~0.1264	北京,天津,河北内蒙古,辽宁,山东
	0.1264~0.1345	吉林,黑龙江
每百人使用计算机数	0.3969~0.3997	青海,新疆
	0.3997~0.4013	黑龙江,四川,云南,甘肃
	0.4013~0.4029	内蒙古,辽宁,吉林,广西,海南,重庆,贵州,陕西,宁夏
	0.4029~0.4039	北京,天津,河北,山西,江苏,安徽,江西,山东,河南,湖北,湖南,广东
	0.4039~0.4043	上海,浙江,福建

表 4 2021 年智慧冷链 GWR 自变量回归系数

Table 4 Regression coefficients of GWR independent variables for intelligent cold chain in 2021

指标	回归系数范围
人均生鲜农产品产量	−0.1223—−0.1225
公路里程	0.0760—0.0761
人均需求量	0.2714—0.2715
每百家企业拥有网站数	0.1303—0.1304
每百人使用计算机数	0.2753—0.2754

服务质量，促进中国智慧冷链高速发展。

利益冲突声明： 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] GOKARN S, CHOUDHARY A. Modeling the key factors influencing the reduction of food loss and waste in fresh produce supply chains[J]. Journal of environmental management, 2021, 294: ID 113063.

[2] ANAND S, BARUA M K. Modeling the key factors leading to post-harvest loss and waste of fruits and vegetables in the agri-fresh produce supply chain[J]. Computers and electronics in agriculture, 2022, 198: ID 106936.

[3] WIŚNIEWSKI T, TUNDYS B. Comparative analysis of sustainability factors in supply chain links. Evidence of empirical research[J]. Procedia computer science, 2022,

207(C): 3358-3366.
[4] APEJI U D, SUNMOLA F T. Principles and factors influencing visibility in sustainable supply chains[J]. Procedia computer science, 2022, 200(C): 1516-1527.
[5] 郭明德, 李红. 农产品冷链物流发展水平评价——基于12典型省市数据分析[J]. 商业经济研究, 2019(1): 125-127.
GUO M D, LI H. Evaluation on the development level of agricultural cold chain logistics—Based on the data analysis of 12 typical provinces and cities[J]. Journal of commercial economics, 2019(1): 125-127.
[6] 王姗姗, 魏遥. 中国农产品物流发展水平评价研究——基于因子分析法和熵值法的分析[J]. 信阳师范学院学报(哲学社会科学版), 2020, 40(4): 40-45.
WANG S S, WEI Y. Research on evaluation of China's aqricultural product logistics development leve—Based on factor analysis and analysis of entropy method[J]. Journal of Xinyang normal university (philosophy and social sciences edition), 2020, 40(4): 40-45.
[7] 张妍. 基于AHP的生鲜农产品冷链物流影响因素评价分析[J]. 农村经济与科技, 2019, 30(1): 162-163.
ZHANG Y. Evaluation and analysis on influencing factors of cold chain logistics of fresh agricultural products based on AHP[J]. Rural economy and science-technology, 2019, 30(1): 162-163.
[8] 剌美香, 李玉萍. 基于FAHP的山西省农产品冷链物流综合评价[J]. 山西农业科学, 2017, 45(8): 1349-1352, 1360.
LA M X, LI Y P. Comprehensive evaluation of the cold-chain logistics for the agricultural products in Shanxi Province based on FAHP[J]. Journal of Shanxi agricultural sciences, 2017, 45(8): 1349-1352, 1360.
[9] 谢清玲. 中国东部地区水产品冷链物流发展水平评价——基于熵-模糊物元分析法[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2020.
XIE Q L. Evaluation of aquatic products cold chain logistics development level in eastern China: Based on Entropy-fuzzy Matter-element[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2020.
[10] 田玉洁, 谢庆红, 王子豪. 基于AHP-熵权法的生鲜农产品冷链物流安全评价[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(5): 185-190.
TIAN Y J, XIE Q H, WANG Z H. Safety assessment of fresh agricultural products cold chain logistics based on AHP-entropy weight method[J]. Storage and process, 2019, 19(5): 185-190.
[11] 张于贤, 黄鑫, 刘瑞环. 基于熵权灰色关联法的中部地区农产品物流发展评价研究[J]. 商业经济研究, 2017(21): 88-91.
ZHANG Y X, HUANG X, LIU R H. Research on evaluation of agricultural products logistics development in central China based on entropy weight grey correlation method[J]. Journal of commercial economics, 2017(21): 88-91.
[12] 李云, 桂海霞, 王向前, 等. 基于熵权-Topsis的中部地区低碳物流发展水平评价[J]. 衡阳师范学院学报, 2022, 43(3): 115-120.
LI Y, GUI H X, WANG X Q, et al. Evaluation of low carbon logistics development level in central China based on entropy weight TOPSIS[J]. Journal of Hengyang normal university, 2022, 43(3): 115-120.
[13] 伦家兴. 中国31个省市物流产业发展水平综合评价研究[J]. 投资与创业, 2021, 32(2): 50-52, 55.
LUN J X. Study on comprehensive evaluation of logistics industry development level in 31 provinces and cities of China[J]. Investment and entrepreneurship, 2021, 32(2): 50-52, 55.
[14] 石雪斌. 基于模糊物元的江苏省农产品物流发展水平评价与提升研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
SHI X B. Development level of agricultural products logistics in Jiangsu province based on fuzzy matter element evaluation and promotion research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
[15] 王晓宇, 黄铭. 基于熵权灰色关联法的物流发展水平评价——以安徽省为例[J]. 黑河学院学报, 2020, 11(9): 50-53.
WANG X Y, HUANG M. Evaluation of logistics development level based on entropy grey relational method—Taking Anhui Province as an example[J]. Journal of Heihe university, 2020, 11(9): 50-53.
[16] 徐耀群, 程林. 基于TOPSIS的生鲜农产品冷链物流企业评价研究[J]. 物流技术, 2017, 36(10): 87-91.
XU Y Q, CHENG L. Study on evaluation of fresh farm produce cold chain logistics enterprise based on TOPSIS[J]. Logistics technology, 2017, 36(10): 87-91.
[17] 饶淑雯. 福建省区域物流能力评价及提升建议——基于熵权-TOPSIS法[J]. 物流科技, 2022, 45(18): 45-49.
RAO S W. On evaluation and improvement suggestions of regional logistics capacity in Fujian province—Based on entropy-weighting TOPSIS method[J]. Logistics sci-tech, 2022, 45(18): 45-49.
[18] 李丹丹, 刘锐, 陈动. 中国省域碳排放及其驱动因子的时空异质性研究[J]. 中国人口・资源与环境, 2013, 23(7): 84-92.
LI D D, LIU R, CHEN D. Research on space-time heterogeneity of carbon emission and influencing factors in provinces of China[J]. China population, resources and environment, 2013, 23(7): 84-92.
[19] 孙忠秋, 李爽, 程承旗. 基于ESDA的长三角区域经济差异分析[J]. 地理信息世界, 2016, 23(1): 71-79.
SUN Z Q, LI S, CHENG C Q. Analyzing regional economic disparities based on ESDA in Yangtze River Delta[J]. Geomatics world, 2016, 23(1): 71-79.
[20] ANSELIN L. Local indicators of spatial association-*LISA*[J]. Geographical analysis, 2010, 27(2): 93-115.
[21] 周广亮, 吴明. 中原城市群物流业发展水平时空分异及影响因素分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 90-98.
ZHOU G L, WU M. Analysis of spatial-temporal differentiation and influencing factors of logistics industry development level in the central plains urban agglomeration[J]. Journal of Henan polytechnic university (natural science), 2021, 40(5): 90-98.

[22] 杨青, 彭若慧, 刘星星, 等. 基于地理加权回归的省域碳排放影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 54-62.
YANG Q, PENG R H, LIU X X, et al. Study on influencing factors of provincial carbon emission based on geographically weighted regression[J]. Journal of environmental engineering technology, 2023, 13(1): 54-62.
[23] 尹硕. 基于我国现状的冷链物流发展之路探究[J]. 中国储运, 2022(11): 205-207.
YIN S. Research on the development of cold chain logistics based on China's current situation[J]. China storage & transport, 2022(11): 205-207.
[24] 吴佳佳. 冷链物流发展存在的问题及对策研究[J]. 中国集体经济, 2022(31): 106-108.
WU J J. Research on the problems and countermeasures in the development of cold chain logistics[J]. China collective economy, 2022(31): 106-108.
[25] 韩佳伟, 李佳铖, 任青山, 等. 农产品智慧物流发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 30-36.
HAN J W, LI J C, REN Q S, et al. Development strategy of intelligent logistics for agricultural products[J]. Strategic study of CAE, 2021, 23(4): 30-36.

Evaluation and Countermeasures on the Development Level of Intelligent Cold Chain in China

YANG Lin[1,2,3,4], YANG Bin[1,2,3], REN Qingshan[1,2,3], YANG Xinting[1,2,3], HAN Jiawei[1,2,3*]

(1. *Research Center of information Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing* 100097, *China*; 2. *National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability, Beijing* 100097, *China*; 3. *Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100097, *China*; 4. *College of Information Science and Technology, Zhongkai Agricultural Engineering College, GuangZhou* 510225, *China*)

Abstract: The new generation of information technology has led to the rapid development of the intelligent level of the cold chain, and the precise control of the development level of the smart cold chain is the prerequisite foundation and guarantee to achieve the key breakthrough of the technical bottleneck and the strategic layout of the development direction. Based on this, an evaluation index system for China's intelligent cold chain development from the dimensions of supply capacity, storage capacity, transportation capacity, economic efficiency and informationization level was conducted. The entropy weight method combined with the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) was used to quantitatively evaluate the development of intelligent cold chain in 30 Chinese provinces and cities (excluding Tibet, Hong Kong, Macao and Taiwan) from 2017 to 2021. The quantitative evaluation of the level of intelligent cold chain development was conducted. The impact of the evaluation indicators on different provinces and cities was analysed by exploratory spatial data analyses (ESDA) and geographically weighted regression (GWR). The results showed that indicators such as economic development status, construction of supporting facilities and informationization level had greater weight and played a more important role in influencing the construction of intelligent cold chain. The overall level of intelligent cold chain development in China is divided into four levels, with most cities at the third and fourth levels. Beijing and the eastern coastal provinces and cities generally have a better level of intelligent cold chain development, while the southwest and northwest regions are developing slowly. In terms of overall development, the overall development of China's intelligent cold chain is relatively backward, with insufficient inter-regional synergy. The global spatial autocorrelation analysis shows that the variability in the development of China's intelligent cold chain logistics is gradually becoming greater. Through the local spatial autocorrelation analysis, it can be seen that there is a positive spatial correlation between the provinces and cities in East China, and negative spatiality in North China and South China. After geographically weighted regression analysis, it can be seen that the evaluation indicators have significant spatial and temporal heterogeneity in 2017, with the degree of influence changing with spatial location and time, and the spatial and temporal heterogeneity of the evaluation indicators is not significant in 2021. In order to improve the overall development level of China's intelligent cold chain, corresponding development countermeasures are proposed to strengthen the construction of supporting facilities and promote the transformation and upgrading of information technology. This study can provide a scientific basis for the global planning, strategic layout and overall promotion of China's intelligent cold chain.

Key words: intelligent cold chain; entropy power method; TOPSIS; exploratory spatial data analysis; geographically weighted regression; evaluation indicator system; informationization level